第46卷 第7期
2023年7月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 7
Jul. 2023

近60 a天山北坡冰川变化研究

杨雪雯[1,2]， 王宁练[1,2,3]， 梁 倩[1,2]， 陈安安[1,2]

（1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；2. 西北大学城市与环境学院地表系统与灾害研究院，陕西 西安 710127；3. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室，北京 100101）

摘 要： 从流域尺度揭示天山北坡冰川变化状况，对下游绿洲地区水资源的合理开发利用具有重要意义。基于多源遥感影像提取天山北坡诸河流域近期冰川边界，结合前期发布的冰川编目及ASTER DEM数据，对该区域冰川面积和物质平衡变化特征进行了分析。结果表明：（1）2015年前后天山北坡共计分布冰川10061条，总面积约4855.85±245.86 km^2。1960s—2015年天山北坡国内段冰川面积萎缩速率为0.52%·a^{-1}±0.06%·a^{-1}，且近年来呈加速萎缩趋势（0.96%·a^{-1}±0.88%·a^{-1}）；1999—2015年天山北坡国外段冰川面积萎缩速率约为0.56%·a^{-1}±0.31%·a^{-1}。（2）2000—2020年天山北坡冰川表面高程变化速率约为−0.57±0.01 m·a^{-1}，冰川物质呈持续亏损态，物质平衡为−0.39±0.04 m w.e.·a^{-1}。（3）天山北坡东、西段冰川面积和物质平衡变化均存在一定的空间差异性，近十几年间，东段各子流域冰川面积萎缩速率和物质亏损速率均相对较大。

关 键 词： 天山北坡；冰川变化；物质平衡；遥感
文章编号： 1000－6060(2023)07－1073－11(1073～1083)

冰川作为冰冻圈的重要组成部分，对气候变化的响应极为敏感[1]。IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）第六次评估报告（AR6）指出，最近10 a间（2011—2020年）地球表层平均气温比1850—1900年高出1.09 ℃（0.95~1.20 ℃），且过去50 a（1970s以来）是近2000 a来气温升幅最快的50 a[2]。在气候变暖的背景下，全球山地冰川普遍呈退缩趋势，造成海平面上升、极端气候事件增多、灾害频发等一系列气候环境问题，引起了国际社会的广泛关注[3-4]。此外，全球约75%的淡水资源都来自于冰川，冰川变化会对区域水资源平衡和经济社会可持续发展带来重要影响[5-6]。因此，冰川变化研究不仅具有重要的科学意义，同时也对区域经济社会发展具有重大的现实意义。

天山山脉地处中亚干旱区，是世界上山地冰川分布最广的山系之一。冰川融水是该区域重要的水资源补给，气候变暖导致的冰川加速消融和退缩对区域水资源量及年内分配产生了重要影响[7-8]。因此，系统开展该区域冰川变化研究，对下游绿洲地区未来水资源的合理规划、利用与管理具有重要指导意义，还能为促进区域可持续发展提供重要科学依据。目前，国内外专家学者已经对天山地区的冰川变化进行了深入的研究。邢武成[9]基于Landsat TM/ETM+遥感影像提取2期中国天山冰川边界，分析冰川变化特征，研究发现1989—2017年中国天山冰川总体呈萎缩状态，冰川面积减少约879.73 km^2，萎缩速率达到0.52%·a^{-1}，且东天山冰川面积萎缩速率最快。Chen等[7]对天山40个流域的冰川变化数据进行统计分析，发现1960s—2010s天山约97.52%的冰川呈退缩状态，其中天山北部和东部退缩趋势

收稿日期： 2022-10-09； **修订日期：** 2022-12-06
基金项目： 国家自然科学基金项目（42130516）；中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20060201，XDA19070302）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK020102）资助
作者简介： 杨雪雯（1996-），女，博士研究生，主要从事冰川变化与水文水资源研究. E-mail: yxw_0117@163.com
通讯作者： 王宁练（1966-），博士，教授，主要从事冰冻圈与全球变化研究. E-mail: nlwang@nwu.edu.cn

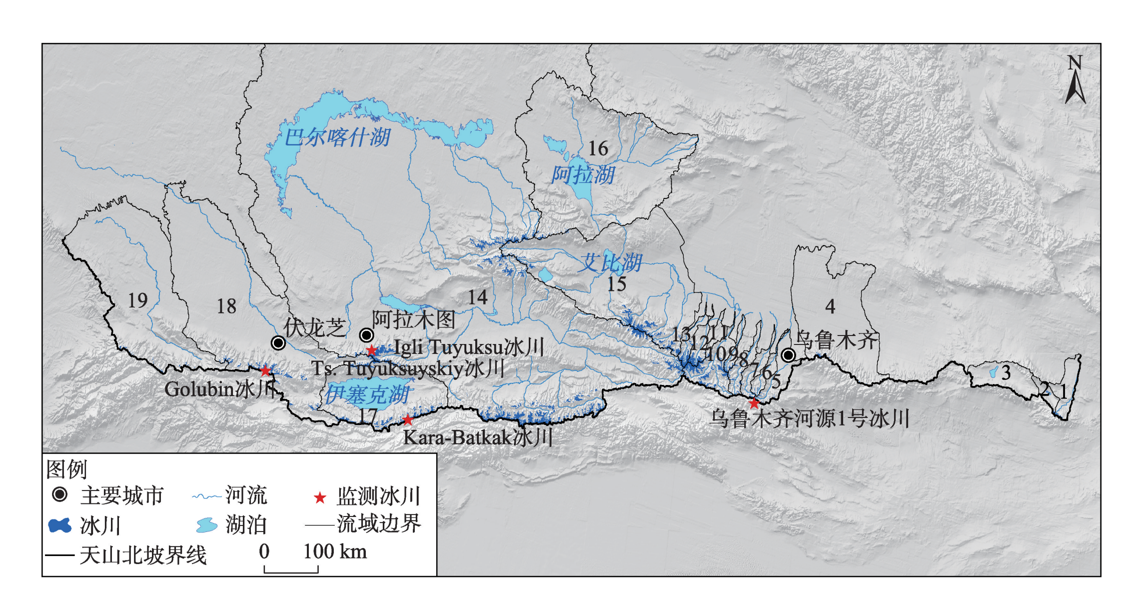
尤为明显。Farinotti等[10]基于重力卫星数据、激光测高数据以及天山不同区域的冰川面积数据，对整个天山的冰川物质亏损状况进行评估，研究发现1961—2012年天山冰川总面积减少约18%±6%，物质亏损约27%±15%。此外，还有众多学者对天山不同区域或子流域如东天山[5]、伊犁河流域[11]、Terskey-Alatoo区域[12]等的冰川变化进行研究，均发现研究区内冰川普遍呈退缩趋势。

已有研究主要侧重于天山国内段不同子流域的冰川变化特征。本文依据河流走向，以流域尺度划分天山北坡范围，基于多源遥感资料获取天山北坡诸河流域近期的冰川边界，结合前期发布的冰川编目数据，揭示该区域近60 a来冰川面积时空变化特征，并基于ASTER DEM数据分析近20 a来该区域冰川物质平衡时空变化特征，以期对整个天山北坡冰川变化状况有更全面的认识，从而为下游绿洲地区水资源的合理开发利用提供重要的理论支撑。

1 研究区概况

天山山脉位于亚洲内陆腹地，是亚洲中部最大的山系之一，也是世界上山地冰川分布最多的山系之一。天山山脉西起图兰平原，向东穿越吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦进入中国新疆境内，全长约2100 km，南北最大宽度约300 km[13]，其中，天山国内段全长约1700 km，山体总面积约5.7×10^5 km^2[14]。天山地区地形高差悬殊，气温变化大且具有明显的空间差异，北坡平均气温低于南坡；降水主要受西风气流和北冰洋气团的影响，空间分布不均，北坡降水量多于南坡[9]。本文研究区为天山北坡(图1)，主要包括哈尔里克山、巴里坤山、博格达山、天格尔山、依连哈比尔尕山、那拉提山、科克铁克山、哈尔克他乌山、捷尔斯格伊阿拉套和塔拉斯阿拉套的北坡，以及博罗克努山、科古琴山、别珍套山、外伊犁阿拉套、吉尔吉斯山等山脉，主要的河流有玛纳斯河、伊犁河、楚河、塔拉斯河等。本文以河流出山口为划分依据提取流域边界，将天山北坡冰川区划分为19个子流域。博格达山北坡包括开垦河、中葛根河、白杨河等流域，这些流域范围均较小且冰川分布相对较少，故在此统一合并为博格达山北坡流域。

天山山脉发育的冰川属于亚大陆型冰川或大陆型冰川，形态类型多样，且以山谷冰川较多[15]。据RGI(Randolph glacier inventory)6.0资料显示，天山北坡诸河流域共计发育冰川7977条，总面积约5059.67 km^2[16]。天山是国际冰川监测的重点区域，乌鲁木齐河源1号冰川、Kara-Batkak冰川、Ts. Tuyuksuyskiy冰川、Igli Tuyuksu冰川和Golubin冰川(图1)是天山北坡的重点监测冰川，自20世纪50、



注：图中数字代表流域编码。1：伊吾河流域；2：幻彩湖流域；3：巴里坤湖流域；4：博格达山北坡流域；5：乌鲁木齐河流域；6：头屯河流域；7：三屯河流域；8：呼图壁河流域；9：塔西河流域；10：玛纳斯河流域；11：宁家河流域；12：金沟河流域；13：安集海河流域；14：伊犁河-巴尔喀什湖流域；15：艾比湖流域；16：阿拉湖流域；17：伊塞克湖流域；18：楚河流域；19：塔拉斯河流域。

图1 天山北坡诸河流域冰川分布

Fig. 1 Distribution of glaciers in the sub-basins on the north slope of Tianshan Mountains

60年代就开始有物质平衡观测记录。Ts. Tuyuksuyskiy冰川和乌鲁木齐河源1号冰川观测序列最长，是国际上公认的全球重点监测冰川，其中乌鲁木齐河源1号冰川是我国监测时间最长、观测资料连续性最好的一条冰川。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 Landsat OLI遥感影像 本文选用Landsat OLI遥感影像（下载于http://glovis.usgs.gov）来提取近期天山北坡冰川边界，数据产品为Level 1T级，空间分辨率为30 m。选取影像时，对天山北坡冰川区2016年消融季末期的所有影像进行综合对比，选取了受云、积雪和山体阴影等因素干扰最小的影像，对于无法获取消融季末期适用影像的区域，通过选取相邻年份的影像予以补充。最终选用70景Landsat OLI影像（表1），影像时段主要集中在2014—2017年，且以2015年为主，故将本文资料时期统称为2015年。此外，在冰川边界解译之前，通过全色波段融合将影像分辨率提高至15 m，以更好地满足冰川边界提取的精度要求。

2.1.2 DEM数据 本文选用美国国家航空航天局发布的ASTER DEM V003（AST14DEM）数据（获取于https://search.earthdata.nasa.gov）用于分析天山北坡冰川表面高程变化。该数据是使用可见光和近红外传感器获取的ASTER Level 1A数据的立体像对生成的数据产品，空间分辨率为30 m，时间覆盖范围为2000—2022年。本文主要选用2000年和2020年消融季末期、受云覆盖影响较小的数据，对于无法获取适用数据的区域，选取邻近年份的数据予以补充。

2.1.3 冰川编目数据 本文选用中国第一次、第二次冰川编目数据，以及RGI 6.0冰川编目数据作为天山北坡冰川边界提取时的参考数据，并在分析冰川变化时使用了该数据。中国第一次冰川编目以20世纪50—80年代的航摄地形图和航空相片为主要数据源[15]，其中天山北坡航片的主要时段为1960s。中国第二次冰川编目（来源于http://westdc.westgis.ac.cn）以2006—2011年Landsat TM/ETM+遥感影像为主要数据源[17]，天山北坡所用影像以2007年为主。RGI 6.0冰川编目（来源于http://www.glims.org/RGI）以1999年及之后的Landsat TM/ETM+影像为主要数据源[16]，中国部分均为第二次冰川编目数据，该数据集中天山北坡国外段的影像时段以1999年为主。在分析各子流域冰川变化时，以其所用影像的主要时段来代表编目的资料时期。

2.1.4 Google Earth影像和SAR影像 本文使用Google Earth影像和SAR影像作为冰川边界提取的参考影像。Google Earth可查看多时相、高分辨率的遥感影像，且以3D形式显示了高原、山地等地形，因而能够清楚识别表碛覆盖冰川的末端、侧碛等准确位置，有效提高解译精度。SAR因具有穿透云层、全天候、部分穿透性及高分辨率的特征，对难以通过光学影像识别的表碛覆盖冰川，参考SAR影像干涉失相干特性进行识别。

2.1.5 冰川物质平衡观测数据 本文在分析乌鲁木齐河源1号冰川、Kara-Batkak冰川、Ts. Tuyuksuyskiy冰川、Igli Tuyuksu冰川和Golubin冰川长期物质平衡变化，以及评估采用大地测量学方法所得天山北坡冰川物质平衡估算结果的准确性时使用了物质平衡观测数据。冰川物质平衡观测数据来源于世界冰川监测服务处（World Glacier Monitoring Service，WGMS）（https://wgms.ch/ggcb）和相关研究[18]。

2.2 研究方法

2.2.1 冰川边界提取方法 利用遥感手段提取冰川边界的方法主要分为目视解译和计算机自动分类2种。考虑到天山地区存在大量的表碛覆盖冰川，难以通过自动分类方法准确识别冰川边界，因此，本文采用目视解译的方法提取冰川边界。对Landsat OLI影像进行假彩色合成，合成后的影像中裸冰区与非冰川区的色彩、纹理等要素的差异十分显著（图2），因此，对于裸冰区而言，可直接根据冰川区与非冰川区显著的色彩差异来提取冰川边界。

而对于冰川的表碛覆盖区，结合Google Earth影像根据表碛覆盖区与非冰川区的色彩和纹理差异，以及表碛覆盖区的地形与水文特征（如冰川末端的拱形地形特征、冰面湖的分布等）进行识别。对于难以通过光学影像识别的表碛冰川，采用C波段Sentinel-1 Level 1 SLC数据和AST14DEM数据进行差分干涉处理，经过精配准生成干涉条纹、滤波消除平地相位、利用DEM模拟相位消除地形相位的过程，得到冰川区干涉相干系数图，结合光学影像与SAR影像干涉失相干特性来进行识别（图3）。冰川

表1 Landsat遥感影像列表

Tab. 1 List of Landsat remote sensing images

影像编号	获取日期（年-月-日）	云量/%	影像编号	获取日期（年-月-日）	云量/%
LC81380302015243LGN00	2015-08-31	4.49	LC81470282016245LGN00	2016-09-01	0.04
LC81380302016214LGN00	2016-08-01	6.21	LC81470292014239LGN00	2014-08-27	4.26
LC81390302015202LGN00	2015-07-21	1.05	LC81470292016245LGN00	2016-09-01	0.14
LC81390302019229LGN00	2019-08-17	6.22	LC81470292017263LGN00	2017-09-20	0.91
LC81410302016267LGN00	2016-09-23	0.29	LC81470302014207LGN00	2014-07-26	1.88
LC81410302017269LGN00	2017-09-26	0.03	LC81470302016245LGN00	2016-09-01	1.01
LC81420302016210LGN00	2016-07-28	0.63	LC81470302017247LGN00	2017-09-04	1.64
LC81420302016242LGN00	2016-08-29	4.20	LC81470312014207LGN00	2014-07-26	17.98
LC81420302017244LGN00	2017-09-01	3.80	LC81470312015226LGN00	2015-08-14	13.77
LC81420302017260LGN00	2017-09-17	0.48	LC81470312016245LGN00	2016-09-01	6.71
LC81420302017276LGN00	2017-10-03	2.51	LC81480292015217LGN00	2015-08-05	2.00
LC81430302014243LGN00	2014-08-31	0.99	LC81480292015233LGN00	2015-08-21	0.81
LC81430302016217LGN00	2016-08-04	0.75	LC81480292016268LGN00	2016-09-24	2.26
LC81430302017203LGN00	2017-07-22	1.26	LC81480312014214LGN00	2014-08-02	12.93
LC81440302014202LGN00	2014-07-21	15.00	LC81480312015233LGN00	2015-08-21	7.09
LC81440302014234LGN00	2014-08-22	1.46	LC81480312016252LGN00	2016-09-08	17.99
LC81440302015285LGN00	2015-10-12	8.08	LC81480312017190LGN00	2017-07-09	5.78
LC81440302017210LGN00	2017-07-29	19.59	LC81490302015208LGN00	2015-07-27	9.69
LC81450292014241LGN00	2014-08-29	0.58	LC81490302015224LGN00	2015-08-12	1.79
LC81450292015196LGN00	2015-07-15	1.34	LC81490302017261LGN00	2017-09-18	0.72
LC81450292015212LGN00	2015-07-31	7.32	LC81490312015224LGN00	2015-08-12	0.99
LC81450292016231LGN00	2016-08-18	9.59	LC81490312016259LGN00	2016-09-15	0.67
LC81450292016263LGN00	2016-09-19	11.35	LC81490312017245LGN00	2017-09-02	1.54
LC81450302014241LGN00	2014-08-29	5.94	LC81500312015231LGN00	2015-08-19	0.50
LC81450302015196LGN00	2015-07-15	0.50	LC81500312016266LGN00	2016-09-22	1.14
LC81450302015212LGN00	2015-07-31	19.06	LC81510302014219LGN00	2014-08-07	0.10
LC81450302016263LGN00	2016-09-19	3.43	LC81510302015254LGN00	2015-09-11	2.06
LC81450312015196LGN00	2015-07-15	0.45	LC81510302017243LGN00	2017-08-31	0.12
LC81460292015203LGN00	2015-07-22	6.10	LC81510312016241LGN00	2016-08-28	0.55
LC81460292019246LGN00	2019-09-03	5.81	LC81520302017218LGN00	2017-08-06	0.18
LC81460302014200LGN00	2014-07-19	1.03	LC81520312014242LGN00	2014-08-30	0.02
LC81460302016222LGN00	2016-08-09	1.66	LC81530312014233LGN00	2014-08-21	0.07
LC81460302018227LGN00	2018-08-15	6.74	LC81530312016239LGN00	2016-08-26	1.19
LC81460312015203LGN00	2015-07-22	11.56	LC81530312018260LGN00	2018-09-17	3.15
LC81460312016222LGN00	2016-08-09	2.50	LC81530312020234LGN00	2020-08-21	3.69

边界提取后，对结果进行了进一步的检查修正，计算了相关属性信息，并且剔除了其中面积<0.01 km^2的对象。

2.2.2 冰川面积变化计算方法 考虑到不同冰川编目获取时间存在差异，为确保面积变化的可对比性，本文采用冰川面积变化率作为衡量面积变化的

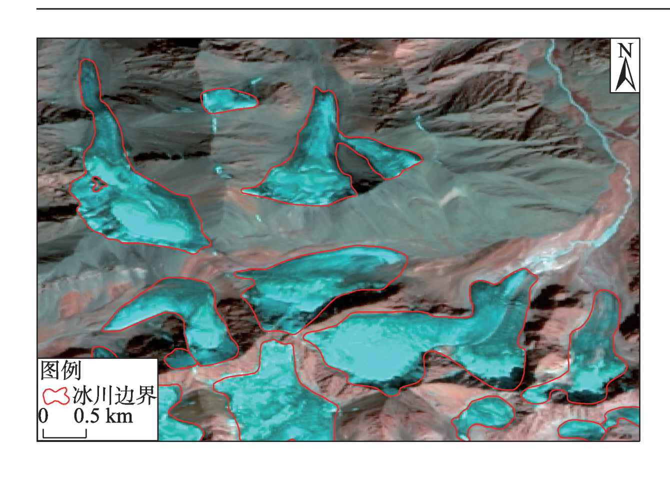


图2 裸冰区冰川边界识别

Fig. 2 Identification of clean-ice boundaries

指标[19]，计算公式如下：

$$AC = \frac{\Delta S_i}{S_i \times \Delta T_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中：AC为冰川面积变化率（%·a^{-1}）；ΔS_i 为第 i 时段的冰川面积变化量（km^2）；S_i 为第 i 时段内起始年份的冰川面积（km^2）；ΔT_i 为第 i 时段的时间间隔（a）。

2.2.3 物质平衡估算方法

（1）DEM配准方法

本文根据Nuth等提出的空间匹配误差导致的高程差与地形因子之间的关系来进行空间位置偏差的校正[20-21]，计算公式如下：

$$dh/\tan(\alpha) = a \times \cos(b - \varphi) + c \tag{2}$$

$$c = \overline{dh}/\tan(\alpha) \tag{3}$$

式中：dh为DEM数据间的高程差（m）；φ 和 α 分别为对应像元的坡向和坡度（°）；a 和 b 分别为水平位移的偏移量（m）和角度（°）；$\overline{dh}$ 为DEM数据间的平均高程差（m）。本文还根据高程差的5%和95%分位数对异常值进行剔除。最后，利用非冰川区高程差残差与最大曲率之间的线性关系，对冰川区的高程差残差进行校正。

（2）物质平衡估算方法

利用大地测量学方法估算冰川物质平衡，计算公式如下：

$$B = \frac{\rho}{S_g} \times \sum_{i=1}^{n} \Delta h_i S_p \tag{4}$$

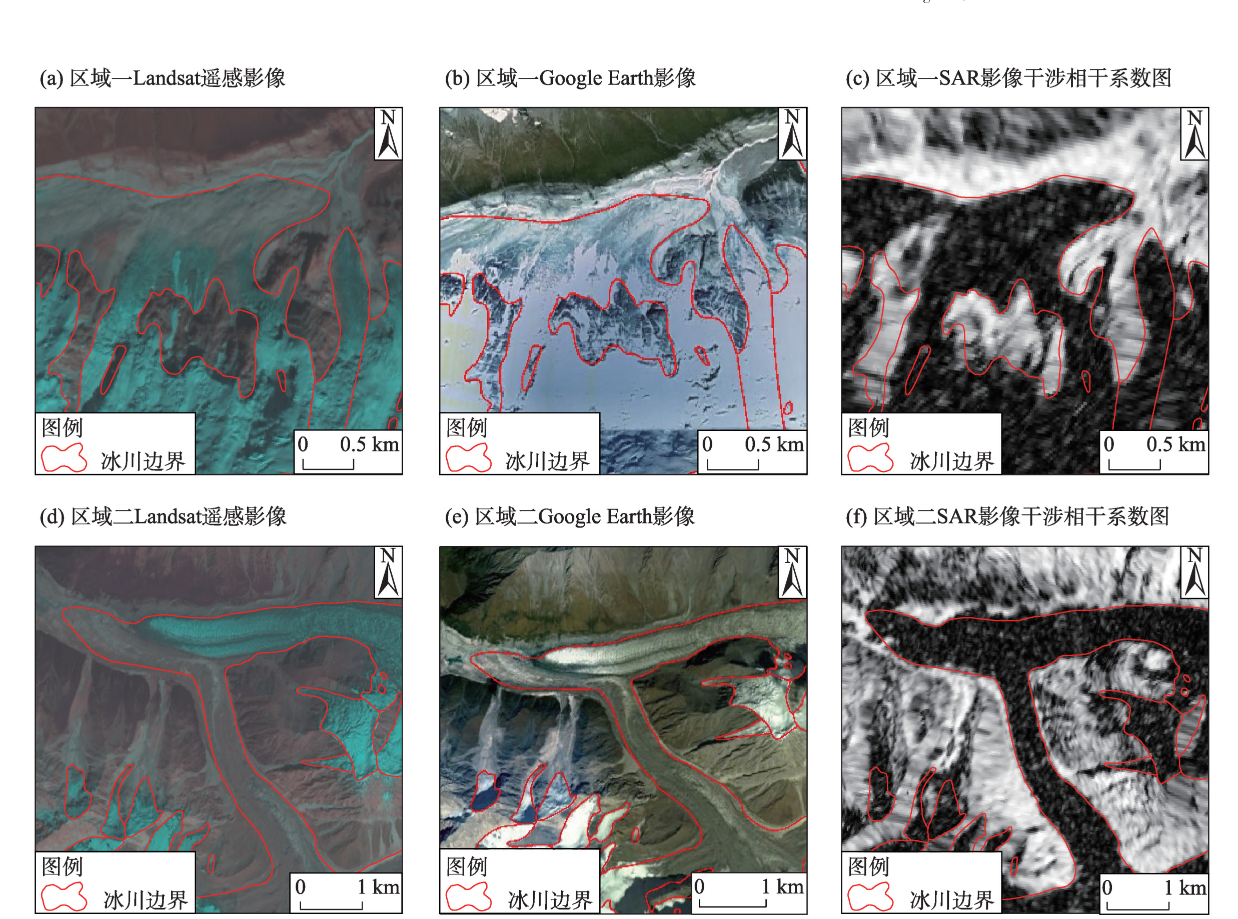


图3 表碛区冰川边界识别

Fig. 3 Identification of debris-covered glacier boundaries

式中：B 为物质平衡(m w.e.·a^{-1})；ρ 为转换密度；S_g 为冰川面积(km^2)；n 为冰川区的像元总数；Δh_i 为研究时段内像元点的高程差(m)；S_p 为单个像元面积(km^2)。本文选用Huss研究推荐的850±60 kg·m^{-3}作为转换密度[22]。

2.2.4 精度评价

(1) 冰川面积误差评估

本文采用统计冰川轮廓线经过的像元数量的方法来评估冰川面积的误差，计算公式如下：

$$E_A = N \times \lambda^2/2 \tag{5}$$

式中：E_A 为冰川面积的不确定性(km^2)；N 为冰川边界(不包括用于冰川分割的山脊线或分冰岭)经过的像元数量；λ 为遥感影像像元大小(融合后的Landsat OLI影像像元大小为15 m)。

(2) 冰川物质平衡误差评估

采用非冰川区平均高程差和平均标准误差来评估冰川表面高程变化的不确定性，计算公式如下：

$$\mathrm{SE} = \mathrm{STDV}/\sqrt{K} \tag{6}$$

$$\sigma = \sqrt{\mathrm{MED}^2 + \mathrm{SE}^2} \tag{7}$$

式中：SE为平均标准误差；STDV为非冰川区DEM高程差的标准差；K 为空间去相关处理(去相关距离设定为600 m)后的像元个数；σ 为DEM数据高程变化的相对误差；MED为非冰川区DEM数据的平均高程差。

研究时段内物质平衡的不确定性(u_M)计算公式如下：

$$u_M = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{t} \times \frac{\Delta\rho}{\rho_W}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{t} \times \frac{\rho_I}{\rho_W}\right)^2} \tag{8}$$

式中：Δh 为冰川区的平均高程差(m)；t 为研究时段长度(2000—2020年)；ρ_W 和 ρ_I 分别为水的密度(1000 kg·m^{-3})和转换密度(850 kg·m^{-3})；$\Delta\rho$ 为冰密度的不确定性(60 kg·m^{-3})。

3 结果与分析

3.1 天山北坡冰川面积变化

3.1.1 天山北坡整体冰川面积变化 2015年前后天山北坡诸河流域共计分布冰川10061条，总面积约4855.85±245.86 km^2。其中，天山北坡国内段共计分布冰川6097条，总面积约3045.09±146.49 km^2。中国第一次冰川编目显示，1960s天山北坡国内段冰川总数量为5764条，总面积约4269.30 km^2；中国第二次冰川编目显示，2007年该区域冰川总数量为5223条，总面积约3299.28±181.68 km^2。通过对比可以看出，1960s—2015年，天山北坡国内段冰川总面积共减少1224.21±146.49 km^2(约28.67%±3.43%)，面积萎缩速率为0.52%·a^{-1}±0.06%·a^{-1}(表2)。其中，1960s—2007年和2007—2015年面积萎缩速率分别为0.48%·a^{-1}±0.09%·a^{-1}和0.96%·a^{-1}±0.88%·a^{-1}，表明该区域冰川在近年来呈加速萎缩趋势。

RGI 6.0冰川编目显示，1999年天山北坡国外段共计分布冰川2754条，总面积约1760.39 km^2。RGI 6.0在天山北坡存在部分区域漏画的问题(图4)，本文对遗漏的冰川予以补充，经统计，2015年天山北坡国外段共计分布冰川3964条，总面积约1810.77±99.37 km^2。为准确分析该区域冰川面积变化状况，将本文提取结果中天山北坡国外段与RGI 6.0资料能够完全对应的共计2790条冰川(约占天山北坡国外段冰川总面积的76%)进行对比，结果显示，这些冰川的总面积从1999年的1505.03 km^{2}萎缩至2015年的1369.08±75.78 km^2，共减少了135.95±75.78 km^2(约9.03±5.04%)，面积萎缩速率约为0.56%·a^{-1}±0.31%·a^{-1}。

3.1.2 天山北坡各子流域冰川面积变化 对天山北坡各子流域冰川面积变化进行统计，结果显示，1960s—2015年天山北坡国内段各子流域冰川面积均呈萎缩趋势，其中头屯河流域冰川面积萎缩速率

表2 1960s—2015年天山北坡国内段冰川面积变化

Tab. 2 Changes in glacier area on the north slope of Tianshan Mountains in China from 1960s to 2015

时段	变化量/km^2	相对变化率/%	相对变化速率/%·a^{-1}
1960s—2007年	−970.02±181.68	−22.72±4.26	−0.48±0.09
2007—2015年	−254.19±233.38	−7.70±7.07	−0.96±0.88
1960s—2015年	−1224.21±146.49	−28.67±3.43	−0.52±0.06

(a) 示例一Landsat遥感影像

图例
RGI 6.0冰川边界
2015年冰川边界
0　1 km

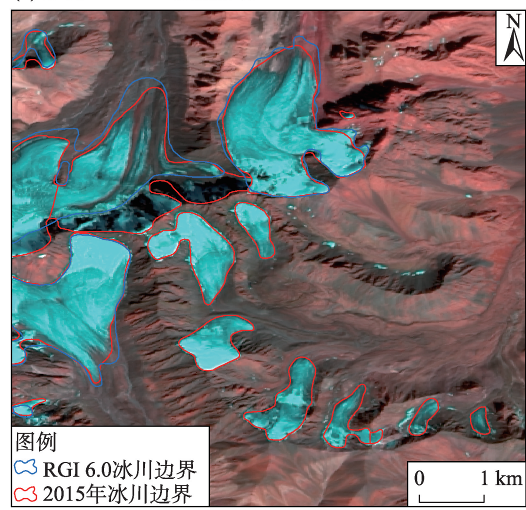


图4　2016年9月1日Landsat OLI影像显示的RGI 6.0资料与本文提取冰川边界对比

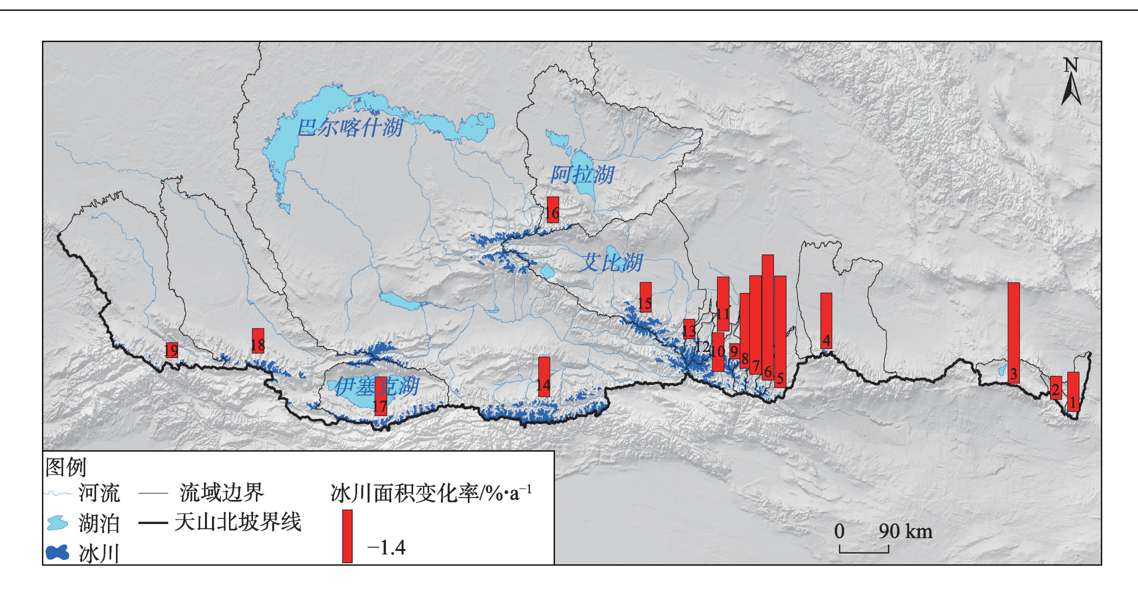
Fig. 4　Comparison between RGI 6.0 data and glacier boundaries extracted in this study by Landsat OLI image on September 1, 2016

最大，达到1.17%·a^{-1}±0.11%·a^{-1}，其次为乌鲁木齐河流域（1.16%·a^{-1}±0.10%·a^{-1}）和巴里坤湖流域（1.16%·a^{-1}±0.08%·a^{-1}），而金沟河流域冰川面积萎缩速率最小（0.20%·a^{-1}±0.07%·a^{-1}）。各子流域冰川面积普遍呈加速萎缩趋势，头屯河流域加速趋势最明显，1972—2007年和2007—2016年冰川面积萎缩率分别为0.99%·a^{-1}±0.17%·a^{-1}和2.83%·a^{-1}±1.33%·a^{-1}。此外，1999—2015年天山北坡国外段各子流域冰川面积均呈萎缩趋势，其中伊塞克湖流域冰川面积萎缩速率最大，达到0.87%·a^{-1}±0.38%·a^{-1}，而塔拉斯河流域冰川面积萎缩速率相对较小（0.34%·a^{-1}±0.42%·a^{-1}）。

为揭示天山北坡冰川面积变化的空间差异，将各子流域近十几年来的冰川面积萎缩速率进行对比，其中，国内和国外部分的时段分别为第二次冰川编目和RGI 6.0至本文冰川提取时段，在此统一表述为2000s—2015年。由于伊犁河-巴尔喀什湖流域既有国内部分也有国外部分，在此取二者的平均变化速率。结果显示（图5），天山北坡冰川面积变化具有明显的空间差异，东段各子流域冰川面积萎缩速率普遍较西段更大，其中头屯河流域萎缩速率最大，达到约2.83%·a^{-1}±1.33%·a^{-1}，其次为乌鲁木齐河流域和巴里坤湖流域，面积萎缩速率分别为2.54%·a^{-1}±1.20%·a^{-1}和2.27%·a^{-1}±1.18%·a^{-1}。冰川面积变化的空间差异与冰川规模、气候、地形等因素有关，气温决定冰川消融，而降水量决定冰川积累。1960s以来天山北坡气温显著增加，东段各子流域升温速率相对较大，尤其以天格尔山北坡气温升幅最为显著[7]，该区域冰川面积萎缩速率也最大；降水量整体呈微弱的增加趋势，东段降水量明显少于西段，其物质补给相应地较少，冰川面积萎缩速率相对较大。此外，冰川面积萎缩速率较大的头屯河和乌鲁木齐河流域冰川平均面积分别仅为0.13±0.01 km^{2}和0.16±0.01 km^2，而萎缩速率较小的金沟河流域冰川平均面积约0.82±0.03 km^2，且天山北坡东段冰川规模总体小于西段。可见，小规模冰川对升温较敏感，消融更强烈，可能是造成天山北坡冰川面积变化空间差异性的重要原因。

3.2　天山北坡冰川物质平衡变化

3.2.1　天山北坡监测冰川物质平衡变化　利用冰川学方法观测得到的物质平衡结果显示（图6），过去几十年间，天山北坡的重点监测冰川（图1）均长期处于负平衡状态。乌鲁木齐河源1号冰川和Ts. Tuyuksuyskiy冰川长期连续的物质平衡观测记录显示，其平均物质平衡分别为−0.34 m w.e.·a^{-1}和−0.38 m w.e.·a^{-1}。为验证本文采用大地测量学方法所得天山北坡冰川物质平衡估算结果的准确性，将本文估算的监测冰川物质平衡与物质平衡观测数据及前人研究结果



注：由于第二次冰川编目数据在金沟河流域(12)不完整，所以其面积变化未比较。

图5 2000s—2015年天山北坡各子流域冰川面积变化

Fig. 5 Changes in glacier area of sub-basins on the north slope of Tianshan Mountains during 2000s—2015

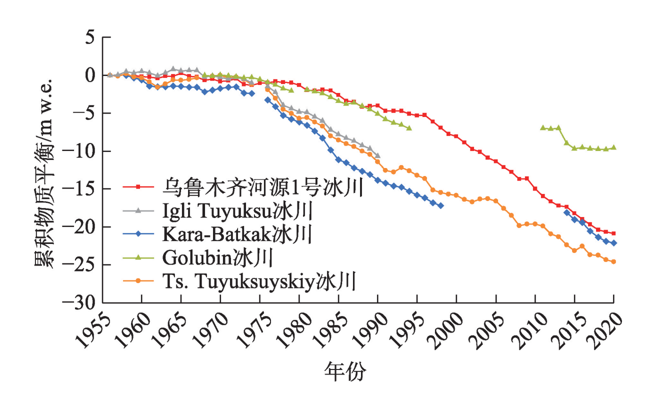


图6 近几十年来天山北坡重点监测冰川累积物质平衡变化

Fig. 6 Changes in cumulative mass balance of monitoring glaciers on the north slope of Tianshan Mountains in recent decades

进行对比(表3)。结果显示，不同方法获取的冰川物质平衡具有较好的一致性，表明本文物质平衡估算结果具有一定的可信度，而不同结果之间存在一定差异的原因可能与研究时段不同、DEM数据精度有限等因素有关。

3.2.2 天山北坡整体及各子流域冰川物质平衡变化 基于2000年和2020年左右的AST14DEM数据，采用大地测量学方法对整个天山北坡冰川物质平衡变化进行估算，结果显示，2000—2020年该区域冰川表面高程明显下降，其变化速率为−0.57±0.01 m·a^{-1}，冰川物质呈持续亏损态，物质亏损速率达到0.39±0.04 m w.e.·a^{-1}。对天山北坡各子流域冰川物质平衡变化进行统计，结果表明，各子流域冰川物质均呈亏损状态，但不同流域的物质平衡变化存在一定的空间差异性(图7)。其中，位于哈尔里克山北坡的伊吾河流域冰川物质亏损速率最大，达到0.68±0.06 m w.e.·a^{-1}，其次为头屯河流域(0.67±0.07 m w.e.·a^{-1})，而宁家河流域物质亏损速率最小。按照RGI资料中天山东、西段的划分依据统计显示，天山北坡东、西段物质平衡估算结果分别为−0.42±0.04 m w.e.·a^{-1}和−0.37±0.04 m w.e.·a^{-1}，可见东段物质亏损速率相对较大。

此外，本文还将冰川物质平衡估算结果与前人研究结果进行了对比。Brun等[27]基于ASTER立体像对估算得到2000—2016年整个天山地区冰川物质平衡为−0.28±0.20 m w.e.·a^{-1}，其中东、西段物质平衡分别为−0.40±0.20 m w.e.·a^{-1}和−0.20±0.08 m w.e.·a^{-1}。该研究与本文在山系分段上存在一定差异，但其划分的天山东段大部分位于本文天山北坡范围内，二者在东段的物质平衡估算结果也较为接近。陈安安[28]利用SRTM DEM和ASTER立体像对数据研究发现，1999—2015s位于天山北坡的伊犁河流域冰川物质平衡为−0.42±0.16 m w.e.·a^{-1}，与本文估算结果(−0.39±0.04 m w.e.·a^{-1})基本一致。此外，关于天山地区物质平衡空间差异性的诸多研

表3 天山北坡重点监测冰川物质平衡结果对比

Tab. 3 Comparison of glacier mass balance for monitoring glaciers on the north slope of Tianshan Mountains

监测冰川	时段	方法	物质平衡/m w.e.·a^{-1}	数据来源
乌鲁木齐河源1号冰川	2002—2017年	冰川学方法	−0.66	WGMS
	2012—2018年	大地测量学方法	−1.13±0.18*	[23]
	2002—2017年	大地测量学方法	−0.48±0.04	本研究
Ts. Tuyuksuyskiy 冰川	2003—2018年	冰川学方法	−0.50	WGMS
	1998—2016年	大地测量学方法	−0.35±0.18	[24]
	2003—2018年	大地测量学方法	−0.51±0.04	本研究
Igli Tuyuksu 冰川	1998—2016年	大地测量学方法	−0.37±0.16	[24]
	2003—2018年	大地测量学方法	−0.37±0.04	本研究
Golubin 冰川	2010—2017年	冰川学方法	−0.38	WGMS
	2000—2019年	模型估算方法	−0.30	[25]
	2003—2017年	大地测量学方法	−0.38±0.03	本研究
Kara-Batkak 冰川	2013—2020年	冰川学方法	−0.70	WGMS
	2000—2018年	模型估算方法	−0.54±0.08	[26]
	2004—2020年	大地测量学方法	−0.45±0.05	本研究

注：*表示冰舌区物质平衡变化；WGMS为世界冰川监测服务处。

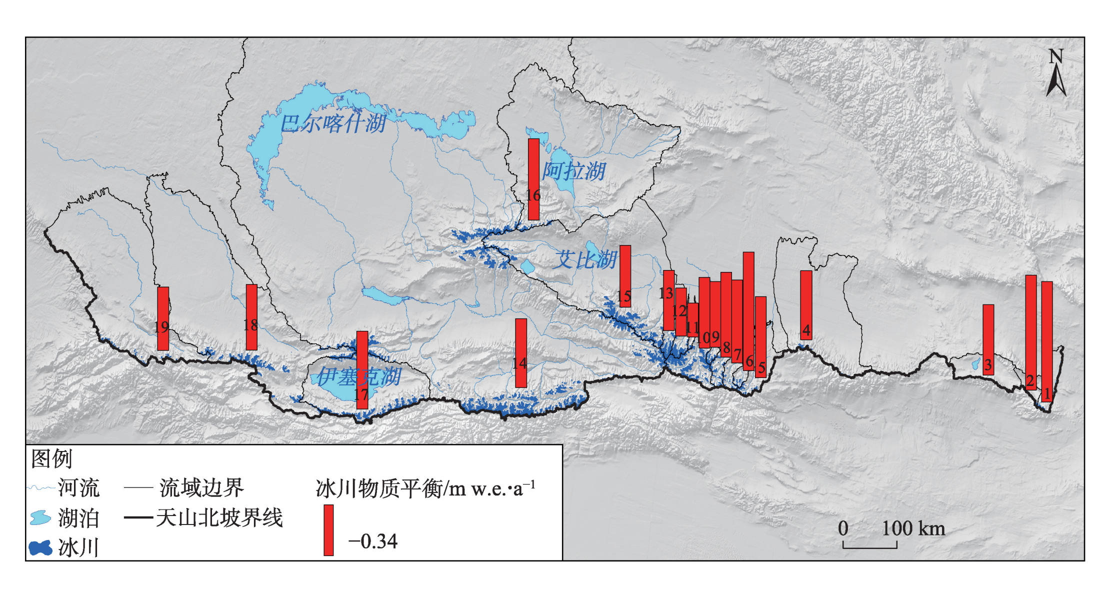


图7　2000—2020年天山北坡各子流域冰川物质平衡变化

Fig. 7　Glacier mass balance of sub-basins on the north slope of Tianshan Mountains during 2000—2020

究结果均显示，近十几年间天山东段冰川物质亏损速率略大于西段[27-30]，与本文研究结果基本一致。

4　结 论

本文基于Landsat OLI遥感影像、Google Earth影像和SAR影像，提取天山北坡诸河流域近期冰川边界，结合中国第一次、第二次冰川编目和RGI 6.0冰川编目数据，分析天山北坡近60 a来冰川面积变化特征，并基于AST14DEM数据分析近20 a来该区域冰川物质平衡变化特征，得到以下主要结论：

（1）2015年前后天山北坡诸河流域共计分布冰川10061条，总面积约4855.85±245.86 km^2。1960s—2015年天山北坡国内段冰川总面积共减少1224.21±146.49 km^2（约28.67%±3.43%），面积萎缩速率为0.52%·a^{-1}±0.06%·a^{-1}，且近年来呈加速萎缩趋势（0.96%·a^{-1}±0.88%·a^{-1}）；1999—2015年天山北坡国外段冰川面积萎缩速率约为0.56%·a^{-1}±0.31%·a^{-1}。天山北坡冰川面积变化具有明显的空间差异，2000s—2015年东段冰川面积萎缩速率相对较大，

其中头屯河流域萎缩速率最大(2.83%·a^{-1}±1.33%·a^{-1}),而西段各子流域冰川面积萎缩速率相对较小。

(2)2000—2020年天山北坡冰川表面高程明显下降,其变化速率为-0.57±0.01 m·a^{-1},该区域冰川物质呈持续亏损态,物质亏损速率达到0.39±0.04 m w.e.·a^{-1}。天山北坡冰川物质亏损存在一定的空间差异性,东段各子流域物质亏损速率相对较大(0.42±0.04 m w.e.·a^{-1}),其中伊吾河流域物质亏损速率最大(0.68±0.06 m w.e.·a^{-1}),而西段各子流域冰川物质亏损速率相对较小。

参考文献(References)

[1] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438. [Shi Yafeng, Liu Shiyin. The calculation of Chinese glacier's response to the globe climatic warming in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 434-438.]

[2] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[3] 王宁练, 刘时银, 吴青柏, 等. 北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响[J]. 中国基础科学, 2015, 17(2): 9-14. [Wang Ninglian, Liu Shiyin, Wu Qingbai, et al. Recent progress in the study of the change of cryosphere in the Northern Hemisphere and its impacts on climate and environment[J]. China Basic Science, 2015, 17(2): 9-14.]

[4] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2: 663-667.

[5] 李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响[J]. 科学通报, 2011, 56(32): 2708-2716. [Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 2708-2716.]

[6] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress[J]. Nature, 2019, 569: 649-654.

[7] Chen Y N, Li W H, Deng H J, et al. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35458, doi: 10.1038/srep35458.

[8] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 1-8. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 1-8.]

[9] 邢武成. 基于Landsat和ICESat数据的中国天山冰川资源时空变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018. [Xing Wucheng. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains based Landsat and ICESat data[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2018.]

[10] Farinotti D, Longuevergne L, Moholdt G, et al. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years[J]. Nature Geoscience, 2015, 8: 716-722.

[11] Xu J L, Liu S Y, Guo W Q, et al. Glacial area changes in the Ili River catchment (northeastern Tian Shan) in Xinjiang, China, from the 1960s to 2009[J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 847257, doi: 10.1155/2015/847257.

[12] Kutuzov S, Shahgedanova M. Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century[J]. Global and Planetary Change, 2009, 69: 59-70.

[13] 刘潮海. 中亚天山冰川资源及其分布特征[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 193-203. [Liu Chaohai. Glacier resources and distribution characteristics in the Central Asia Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(3): 193-203.]

[14] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. [Hu Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.]

[15] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. [Shi Yafeng. Concise Chinese glacier inventory[M]. Shanghai: Shanghai Scientific Popularization Press, 2005.]

[16] Pfeffer W T, Arendt A A, Bliss A, et al. The Randolph glacier inventory: A globally complete inventory of glaciers[J]. Journal of Glaciology, 2014, 60(221): 537-552.

[17] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]

[18] 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 等. 过去44年乌鲁木齐河源一号冰川物质平衡结果及其过程研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 76-80. [Yang Hui'an, Li Zhongqin, Ye Baisheng, et al. Study on mass balance and process of glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River in the past 44 years[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 76-80.]

[19] 贺晶. 1960s—2015年祁连山现代冰川变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2020. [He Jing. Glacier variations in the Qilian Mountains, northwest China, between 1960s and 2015[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.]

[20] Nuth C, Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. The Cryosphere, 2011, 5: 271-290.

[21] Shean D E, Alexandrov O, Moratto Z M, et al. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 116: 101-117.

[22] Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change[J]. The Cryosphere, 2013, 7(1): 877-

887.

[23] 李宏亮, 王璞玉, 李忠勤, 等. 基于多源数据的天山乌鲁木齐河源1号冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1018-1026. [Li Hongliang, Wang Puyu, Li Zhongqin, et al. Research on the changes of the Urumqi Glacier No.1, Tianshan Mountains based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1018-1026.]

[24] Kapitsa V, Shahgedanova M, Severskiy I, et al. Assessment of changes in mass balance of the Tuyuksu group of glaciers, northern Tien Shan, between 1958 and 2016 using ground-based observations and Pléiades Satellite imagery[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 259, doi: 10.3389/feart.2020.00259.

[25] Azisov E, Hoelzle M, Vorogushyn S, et al. Reconstructed centennial mass balance change for Golubin glacier, northern Tien Shan[J]. Atmosphere, 2022, 13: 954, doi: 10.3390/atmos13060954.

[26] Van Tricht L, Paice C M, Rybak O, et al. Reconstruction of the historical (1750—2020) mass balance of Bordu, Kara-Batkak and Sary-Tor glaciers in the inner Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 734802, doi: 10.3389/feart.2021.734802.

[27] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016 [J]. Nature Geoscience, 2017, 10: 668-673.

[28] 陈安安. 基于多源DEM的近50年高亚洲地区冰川物质平衡研究[D]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2017. [Chen An'an. Glacier mass budgets in the High Mountain Asia based on multi-source DEMs over past 50 years[D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, University of Chinese Academy of Sciences, 2017.]

[29] Fan Y B, Ke C Q, Zhou X B, et al. Glacier mass-balance estimates over High Mountain Asia from 2000 to 2021 based on ICESat-2 and NASADEM[J]. Journal of Glaciology, 2022, 69(275): 500-512.

[30] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232. [Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1220-1232.]

Glacier changes on the north slope of Tianshan Mountains in recent 60 years

YANG Xuewen[1,2], WANG Ninglian[1,2,3], LIANG Qian[1,2], CHEN An'an[1,2]

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Institute of Earth Surface System and Hazards, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources (TPESER), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Understanding glacier changes on the north slope of the Tianshan Mountains on the basin scale is critical for the rational development and use of water resources in downstream oases. The recent glacier boundaries on the north slope of the Tianshan Mountains were obtained based on multisource remote sensing images. Combined with the glacier inventory released earlier and ASTER DEM, changes in the glacier area and mass balance in this region were analyzed. The results revealed that: (1) A total of 10061 glaciers were distributed on the north slope of the Tianshan Mountains around 2015, with a total area of 4855.85±245.86 km^2. The glacier area on the north slope of the Tianshan Mountains in China decreased at a rate of 0.52%·a^{-1}±0.06%·a^{-1} from 1960s to 2015. Furthermore, an accelerated decreasing trend was observed (0.96%·a^{-1}±0.88%·a^{-1}). The glacier area in the foreign part of the north slope of Tianshan Mountains decreased at a rate of 0.56%·a^{-1}±0.31%·a^{-1} from 1999 to 2015. (2) The change rate of glacier surface elevation on the north slope of Tianshan Mountains from 2000 to 2020 was −0.57±0.01 m·a^{-1}, and the glacier mass balance was −0.39±0.04 m w.e.·a^{-1}. (3) An obvious spatial difference exists in the changes of glacier area and mass balance in the eastern and western parts of the north slope of Tianshan Mountains, and high decreasing rates of glacier area and mass balance were observed in the eastern part.

Key words: north slope of Tianshan Mountains; glacier change; mass balance; remote sensing